

少年班学院 17级 创新一班



# 电磁学小论文答辩

**答辩人 陈铤灵**  
**指导教师 卢荣德**

## 目 录

趋肤效应的理论分析、软件模拟以及实验设计验证

- 1.研究起因与思路
- 2.理论证明趋肤效应的存在性
- 3.利用COMSOL仿真模拟验证其存在性
- 4.设计简单电学实验验证趋肤效应存在性
- 5.相关应用以及论文总结

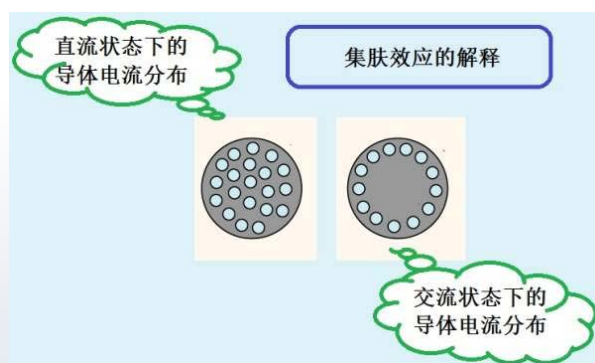
## 研究起因与思路

### 研究起因与思路

对该问题的想法来源于课本上关于趋肤效应的简短的介绍，我认为该现象十分有趣，并且在实际生活中有很大的意义，经过相关资料查阅后发现相关理论公式不够直观，并没有很直接的解释趋肤效应的产生原因，于是我试图对其进行进一步探究。

本人通过已学的数学物理知识，从理论层面对该现象产生原因加以证明，并运用COMSOL Multiphysics 仿真模拟软件分析导体通以高不同频率交电流时电流密度分布，以及设计电学实验证明趋肤效应的存在性。

## 理论证明



### 相关介绍

趋肤效应是指导体中有交流电或者交变电磁场时，导体内部的电流分布不均匀的一种现象。随着与导体表面的距离逐渐增加，导体内的电流密度呈指数递减，即导体内的电流会集中在导体的表面。从与电流方向垂直的横切面来看，导体的中心部分几乎没有电流流过，只在导体边缘的部分会有电流。简单而言就是电流集中在导体的“皮肤”部分，所以称为集肤效应。

## 理论证明

设 $I_0$ 是代表通过导线的交变电流， $\varepsilon$ 和 $I$ 为 $I_0$ 变化时，任一闭合回路 $l$ 上产生的感应电动势和涡流电流。本次证明按照图一方向展开

对该回路，感应电动势，自感电动势，感应电流满足基尔霍夫定律  $\varepsilon + \varepsilon_L = RI$

$$\text{由毕奥萨伐尔定律 } \vec{B}_0 = -\frac{\mu_0}{4\pi} \oint \frac{I_0 d\vec{l} \times \vec{r}}{r^2}$$

又  $I_0 = I_m \sin \omega t$  代入得

$$B_0 = B_m \sin \omega t$$

我们得到  $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$

其中 $B_m$ 为周期最大磁场强度、 $\Phi_m$ 为周期最大磁通量

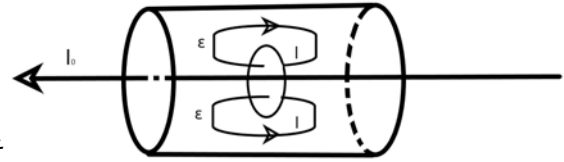


图1-交变电流产生涡流电流原理图

## 理论证明

在电流管上产生感应电动势为

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt} (\Phi_m \sin \omega t) = -\omega \Phi_m \cos \omega t = \omega \Phi_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

由此可知  $\varepsilon = \varepsilon_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$  其中  $\varepsilon_m$  为周期最大感应电动势

由自感电动势  $\varepsilon_L = -L \frac{dI}{dt}$

我们可以列出微分方程  $\frac{dI}{dt} + \frac{R}{L} I = \frac{\varepsilon_m}{L} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$

## 理论证明

通过常微分方程基本求解方法解出

$$I = \frac{\varepsilon_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \left[ \frac{R}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) - \frac{\omega L}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \right]$$

令  $\frac{R}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$  为  $\cos\alpha$ ，则  $\frac{\omega L}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$  为  $\sin\alpha$

$$I_m = \frac{\varepsilon_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$$

故最终可以得到该导体内的涡旋电流

$$I = I_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \arctan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right)\right)$$

## 理论证明

$$I = I_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \arctan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right)\right)$$

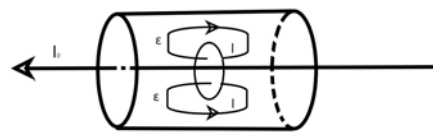


图1-交变电流产生涡旋电流原理图

当交变电流频率 $\omega$ 极大时， $\omega L \gg R$ ，此时 $\arctan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right)$ 趋向于 $\frac{\pi}{2}$ ，此时处于导体中心处涡电流相位与交变电流相位相反，对回路L，位于导体表面处涡电流与导体中心涡流方向相反，故此时导体表面电流强度为交变电流与涡电流的同向叠加，故产生电流集中在导体表面现象，即趋肤效应。

## COMSOL仿真模拟



- **软件介绍**
- COMSOL Multiphysics是一款大型的高级数值仿真软件。广泛应用于各个领域的科学研究以及工程计算，模拟科学和工程领域的各种物理过程。
- COMSOL Multiphysics是以有限元法为基础，通过求解偏微分方程（单场）或偏微分方程组（多场）来实现真实物理现象的仿真，用数学方法求解真实世界的物理现象

### COMSOL仿真模拟

#### 仿真研究类型

为更加直观并便于达到验证趋肤效应目的，我们研究不同频率时其电流密度分布情况，为此我们开始执行频域仿真。

#### 建模参数设计

我们选择AC/DC中的磁场模块作为物理场，我们选取一材料为铜的圆柱，其厚度0.04m,半径为0.08m，假设该铜柱内有一通有交流电的载流线圈，设该载流线圈半径0.015m设置频域分别为10HZ、200HZ和2000HZ以示区分，线圈激励电压为0.1mv，我们假设系统外部为空气，材料的各项参数由系统给出，我们假设整个系统在一个边长为0.1m且内部充满空气的立方体内。

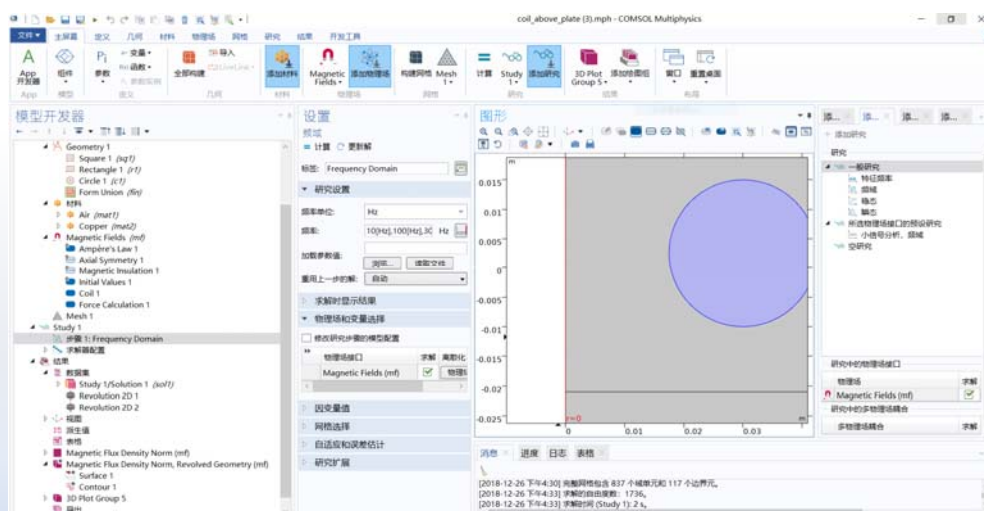
## COMSOL仿真模拟

## 主要步骤

- 1.选择物理场，选择几何类型，选择频域研究。
- 2.利用系统的几何工具栏绘制出所需二维轴对称图像。
- 3.添加材料，将材料添加至相关域中。
- 4.在磁场栏中选择线圈，设置各项初始值，检查系统各项参数是否残缺，是否将各几何面基本物理条件描述清楚，确保该物理模型完整可研究。
- 5.定位到几何实体选择栏，选择需要研究的域。
- 6.将各项参数设置完毕以后，创建绘图组，将结果可视化，选择绘制感应电流，开始仿真模拟计算。
- 7.建立二维、三维模型视图，结束建模过程。

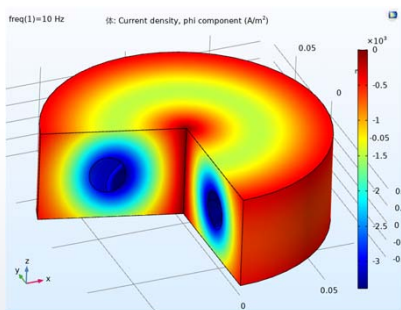
## COMSOL仿真模拟

## 用户界面截图

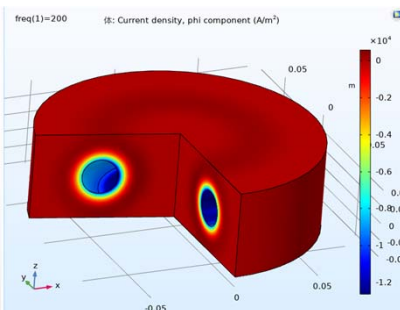


## COMSOL仿真模拟

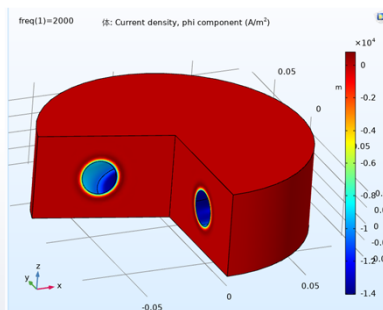
## 模拟结果（三维视图）



频率为10HZ时铜圆柱  
内部电流分布三维图像



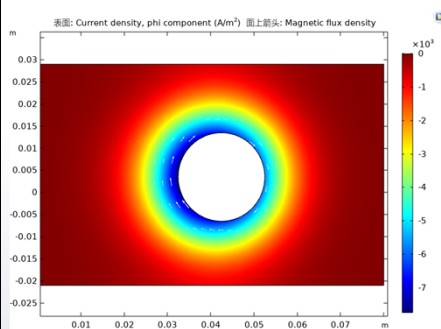
频率为200HZ时铜圆柱  
内部电流分布三维图像



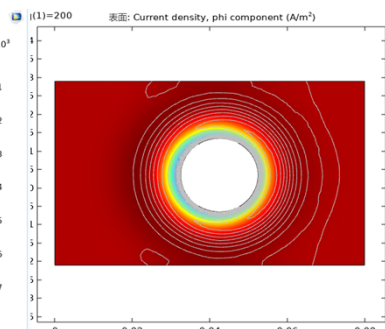
频率为2000HZ时铜圆柱  
内部电流分布三维图像

## COMSOL仿真模拟

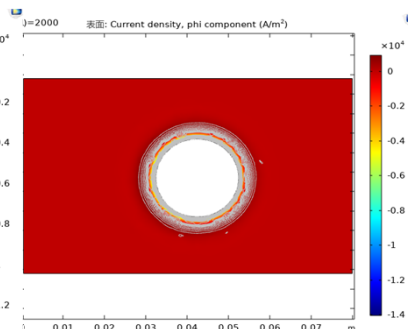
## 模拟结果（二维视图）



频率为10HZ时铜圆柱内部  
电流分布二维图像



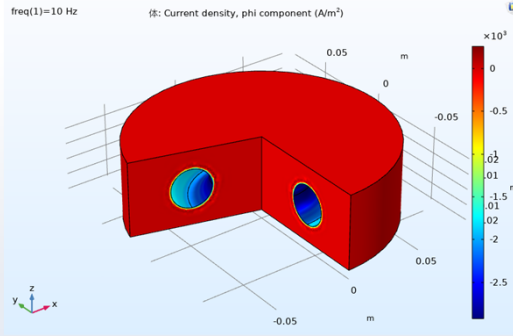
频率为200HZ时铜圆柱内部  
电流分布二维图像



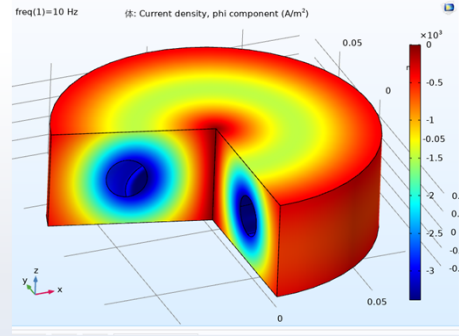
频率为2000HZ时铜圆柱内  
部电流分布二维图像

## COMSOL仿真模拟

- 此外我们将材料由铜改为铁，研究在频率为10HZ的情况，铁的相对磁导率为4000。以下为对比图。

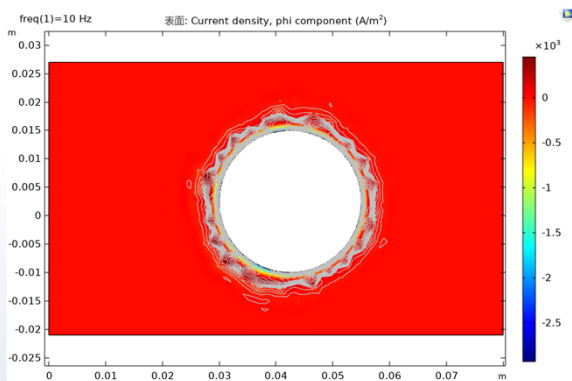


频率为10HZ时铁圆柱内部电流分布  
三维图像

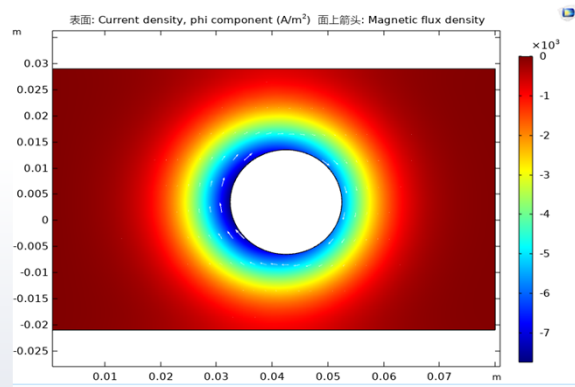


频率为10HZ时铜圆柱内部电流分布三  
维图像

## COMSOL仿真模拟



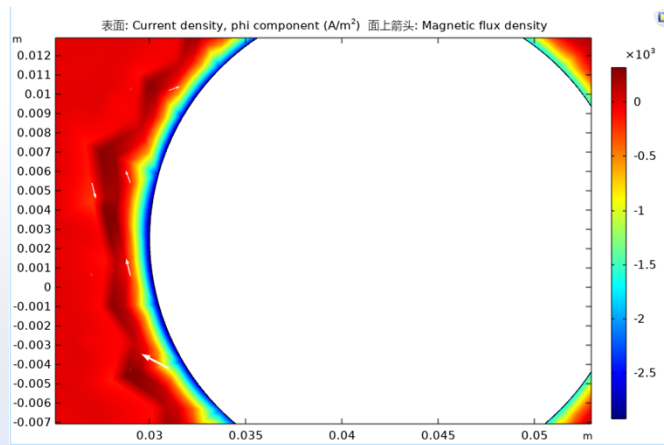
频率为10HZ时铁圆柱内部电流分布二  
维图像



频率为10HZ时铜圆柱内部电流分布三维图  
像



## COMSOL仿真模拟



## COMSOL仿真模拟

- 通过以上仿真实验，我们发现频率越高，感应电流存在的区域越小，即所谓的趋肤深度越小。电流强度不变，仅仅改变交流电频率，我们发现电流密度的分布发生了改变，且随着频率的增加更加向该导体的外表面分布（由于该圆柱内部挖空一圆环，故该圆环区域为此圆柱的外部）
- 我们还发现，导体的磁导率越大，通以相同交流电下其趋肤效应约明显。
- 由此，我们可以基本认为趋肤效应的存在性是正确的，且随着交流电频率增大，导体磁导率越大，趋肤效应越加显著。

## 实验验证

### 实验目的

本实验为验证性实验，希望验证当导体内通入不同频率交变电流时，导体内部的电流集中在导体表面，为此我们设计一简单装置将导体简化。

其中导体简化模型实物如图（等效于一铜棒嵌在一铜杯底部）



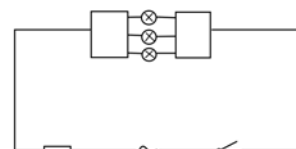
## 电学实验设计证明存在性

### 实验仪器

自制导体模型，导线，三个小灯泡，开关，电路保护装置，直流电源，交流电源。

### 实验步骤

- 1.将导体模型接入电路中，按图连电路。
- 2.通入直流电，观察小灯泡亮度。
- 3.通入低频交流电，观察小灯泡亮度。
- 4.通入高频交流电，观察小灯泡亮度。

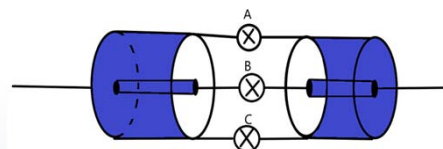


实验电路图

## 电学实验设计证明存在性

### 实验现象

经观察发现通入直流电时B灯较暗，A、C灯较亮，当通入低频交流电时，B灯变暗，A、C灯变亮，提高交流电的频率，B灯亮度更低，A、C灯亮度增加。



### 实验结论

在通入交流电时存在趋肤效应，且随着交流电频率的增加，趋肤效应更加明显。

## 电学实验设计证明存在性

### • 实验改进

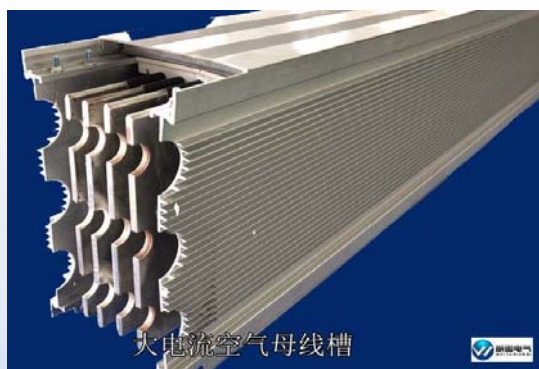
由于本次实验为验证性实验，且限于时间以及材料原因，为更好展示出实验效果，本人给出此实验相关改进方案：

- 1.可利用车床将导体模型加工，使其厚度均匀，各处连接紧密。
- 2.为更好观察到实验现象，我们可将铜换为铁质磁性材料，这样会使得实验在通入低频交流电时也能很好的观察到趋肤效应。
- 3.可将实验装置改为半径足够大的实心铜柱，在通以高频交流电后利用热感应装置直接观察到趋肤效应。

## 相关应用以及论文总结

### 相关应用

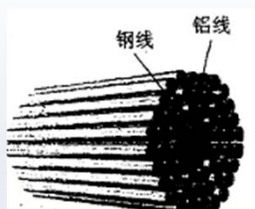
为了有效地利用导体材料和使之散热，大电流母线常做成槽形或菱形



### 相关应用及论文总结

### 相关应用

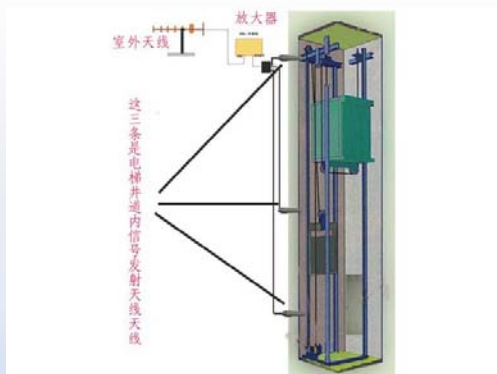
由于趋肤效应，高电压大电流的架空电力线路通常使用钢芯铝绞线，这样能使铝质部分的工作部分温度降低，减低电阻率，电阻率较大的钢芯上承载极少的电流，从而最大化减小电阻。



## 相关应用及论文总结

### 相关应用

趋肤效应也是电磁屏蔽的方法之一，利用趋肤效应可以阻止高频电磁波透入良导体而作成电磁屏蔽装置，这也是电梯里手机信号不好的原因之一，故在许多电梯内常常安装信号放大器。



## 相关应用及论文总结

### 论文总结

本次小论文从三个方面证明了趋肤效应的存在性，并补充了趋肤效应在我们日常生活中广泛的应用，由此可以肯定该研究内容的正确性与重要性。

通过本次研究过程，我体会到在物理的学习过程中，要时刻对一切事物产生怀疑态度（即使是已经被前人所证实过），并充分利用所学知识以及所掌握的工具对问题进行有效解答，对已有的研究不断改进补充与应用。更进一步，提出新的研究方向，为物理的发展贡献一份力。

